



## SYMPOSIUM 1986 MONTREAL

ANALYSE DE LA CAVITATION D'ENTREE D'UN AUBAGE KAPLAN

PAR L'APPLICATION D'UNE METHODE DE CALCUL INVERSE

BI-DIMENSIONNELLE

par

M. J.-N. FAVRE, ingénieur,  
Institut de Machines Hydrauliques et de Mécanique de Fluides  
de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

M. W. WALTHER, ingénieur,  
Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey S.A.

### RESUME

Sur la base, d'une part de mesures et d'observations effectuées sur un modèle de roue Kaplan et d'autre part d'un calcul d'écoulement potentiel appliqué à différentes coupes cylindriques de cette roue, certaines conditions, conduisant à une réduction de la cavitation d'entrée, ont été déterminées pour un point de fonctionnement. A l'aide d'une méthode de calcul potentiel inverse, une modification de la forme du bord d'attaque de l'aube a été étudiée et réalisée sur le modèle. La comparaison des résultats d'essai de la nouvelle roue avec l'ancienne confirme qu'une amélioration des performances en cavitation est possible par cette méthode.

### SYNOPSIS

Using the flow measurements and observations on a model of a Kaplan runner and the potential flow calculation on different rotor's cylindrical streamlines, we determine some of the conditions for reducing the inlet cavitation at an operating point. A modification of the blade's leading edge is proposed, using an inverse potential flow calculation. This is then applied to the model. A comparison of the test results on both rotors shows that the cavitating performances can be improved by this method.

## 1. INTRODUCTION

Le critère de la tenue en cavitation d'un aubage de turbine est souvent déterminant dans le dimensionnement d'un projet hydroélectrique. Le choix du diamètre de la machine, son implantation, ainsi que la limite supérieure du débit admissible peuvent être dictés par la cavitation. L'intérêt économique de meilleures performances dans ce domaine est dès lors évident.

En ce qui concerne les turbines axiales, différents types de cavitation peuvent apparaître. Citons tout d'abord la cavitation au moyeu, se manifestant principalement dans le domaine des fortes charges. Ce type de cavitation n'entraîne pas de dégâts significatifs aux pales, mais peut être mis en relation directe avec la baisse du rendement consécutive à la diminution du coefficient de cavitation  $\sigma_y$  de l'installation. On observe que la cassure de la courbe d'évolution du rendement en fonction de la baisse du coefficient de cavitation, cassure généralement caractérisée par la notion de  $\sigma$  critique, (ou  $\sigma$  standard), est atteinte pour un développement de la cavitation moyeu dépassant l'assiette. Le lien entre la figure de cavitation au moyeu et la baisse de rendement est ainsi assez clairement établi.

Toujours dans le domaine des fortes charges, il peut apparaître, en plus de la cavitation moyeu, une cavitation à bulles côté extrados, près de l'arête de sortie. Ce type de cavitation, directement lié à l'évolution générale de la pression le long de l'aubage, peut causer des dégâts importants; il n'intervient cependant que pour des valeurs de  $\sigma$  relativement basses.

Une troisième forme de cavitation est la cavitation marginale liée directement au jeu entre la roue et le manteau. Celle-ci peut être maîtrisée relativement facilement par la pose de collerettes à la périphérie des aubes.

La forme de cavitation qui nous intéresse ici plus particulièrement est la cavitation d'entrée, se produisant principalement dans la région des hautes chutes et grands débits. Il s'agit d'une cavitation à poches, dépendant très fortement de la forme et du niveau de la dépression à l'entrée, proche du bord d'attaque. Cette répartition de pression est liée directement à la géométrie de l'aube à l'entrée.

Si l'on considère les performances d'un aubage Kaplan dans une représentation  $\phi + \psi$ , le  $\phi$  étant proportionnel au débit et le  $\psi$  à l'énergie massique  $gH$ , (figure 1), les lignes à équi -  $\sigma$  critique se présentent comme un faisceau sensiblement rectiligne dans la zone de fonctionnement normal d'une telle machine. En ce qui concerne la région des basses chutes et jusqu'à environ 80% du  $\psi$ , c'est le critère baisse du rendement, caractérisé par la valeur de  $\sigma$  critique qui est prépondérant. Il n'en est pas de même pour les valeurs plus grandes de  $\psi$ , et notamment au-dessus du sommet, où les figures de cavitation d'entrée sont caractérisées par une valeur de  $\sigma$  admissible, en-dessous de laquelle la machine est réputée ne pas devoir fonctionner de manière prolongée. La valeur d'un coefficient de cavitation limite basé sur des observations garde un caractère subjectif, mais peut conduire à une limitation du débit spécifique maximum, ce qui n'est pas sans importance dans l'économie d'un projet.

Le travail présenté ici est une tentative de diminution de la cavitation d'entrée d'un aubage modèle réduit 4 pales, sans altération des caractéristiques de rendement, par modification du profilage d'entrée, conduisant à une réduction de l'écart entre les valeurs de  $\sigma$  critique et  $\sigma$  admissible dans la région du  $\psi_{\hat{}}$ .

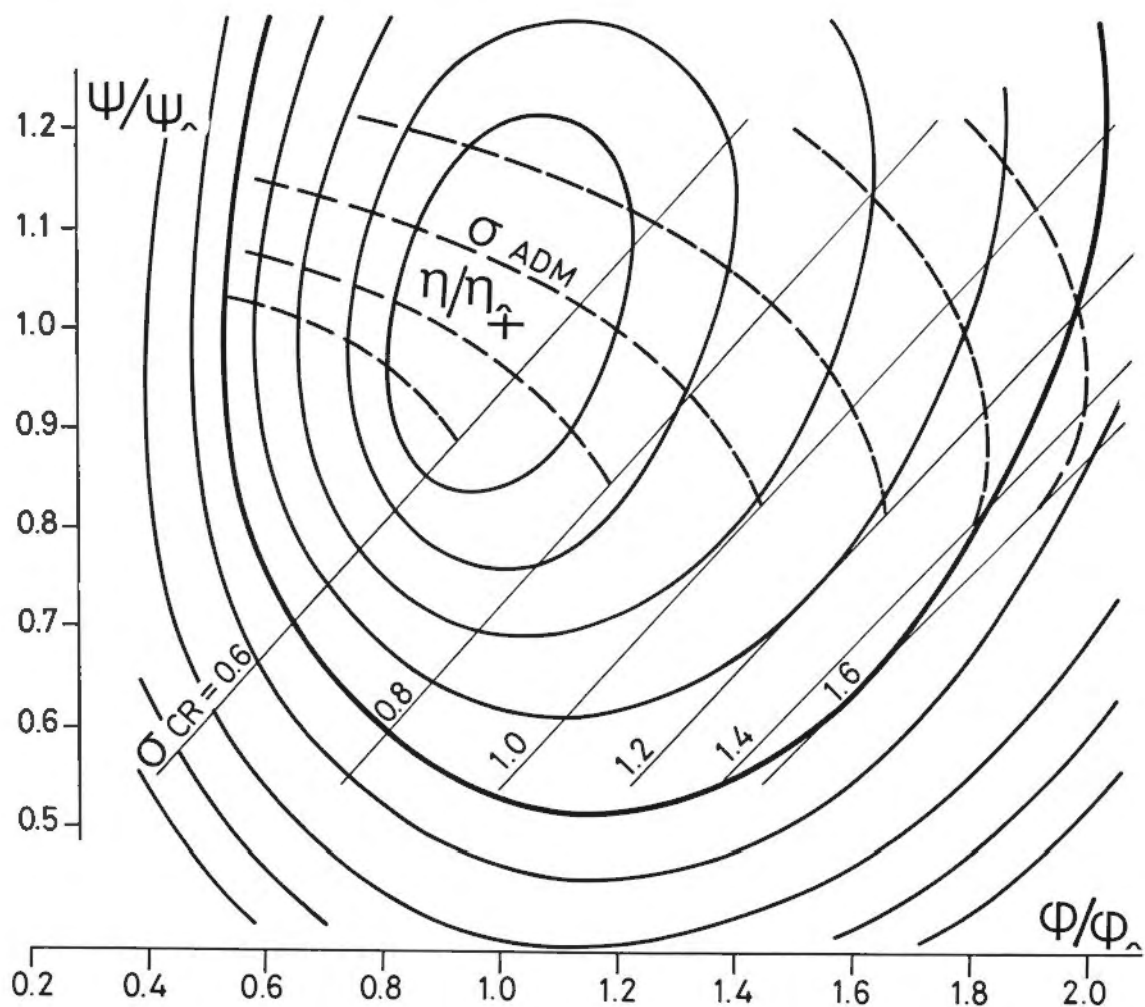


Figure 1: Lignes équi-sigma dans une représentation  $\phi + \psi$

## 2. MOYENS MIS EN OEUVRE

La modification du profilage d'entrée est basée sur un calcul potentiel en grille bi-dimensionnelle, obtenue par déroulement d'une coupe cylindrique de l'aubage.

Les 2 composantes de la vitesse sont déterminées séparément tout autour du profil, au moyen d'une distribution de singularités, en l'occurrence des sources réparties linéairement sur un polygone situé à l'intérieur du profil (méthode des panneaux internes). Au vu de la répartition de pression obtenue par le calcul on détermine sur chaque filet le danger de cavitation représenté par le pic de dépression au bord d'attaque, et le cas échéant on impose une nouvelle répartition de pression permettant de réduire, voire d'annuler ce danger.

Le calcul inverse proprement dit s'effectue à partir d'une répartition de pression calculée autour d'un profil de base, qu'on perturbe pour atteindre le niveau de pression désiré. Un calcul mettant en oeuvre des petites perturbations permet, après linéarisation, d'obtenir, grâce au découplage des 2 composantes  $V_x$  et  $V_y$ , les nouvelles valeurs

$$Y_i + \Delta Y_i = \frac{(V_y + \Delta V_y)_i}{(V_x + \Delta V_x)_i}$$

Ce calcul de la pente du profil, effectué tout autour de celui-ci, permet d'obtenir, après intégration, les valeurs  $Y_i(x)$  du nouveau contour, les abscisses  $X_i$  restant fixes.

### 3. APPLICATION DU PROGRAMME DE CALCUL A UN MODELE KAPLAN

La méthode décrite ci-dessus a été appliquée à un aubage modèle réduit Kaplan 4 pales de rayon extérieur  $R_e = 225$  mm et rayon au moyeu  $R_i = 90$  mm.

La détermination des zones de l'arête d'entrée à modifier passe tout d'abord par un calage du calcul par rapport aux sondages de vitesses effectués en amont et en aval de la roue. Celui-ci a été effectué au point de fonctionnement A de la colline de rendement (voir figure 2), soit au  $\psi_{\wedge}$ , et à un débit relatif d'environ  $\phi/\phi_{\wedge} = 1.3$ , sur 4 coupes cylindriques.

La vitesse  $\vec{W}_{\infty} = 1/2 (\vec{W}_1 + \vec{W}_2)$  choisie comme base de comparaison est considérée comme la vitesse potentielle infinie de la grille. Les vitesses  $W_1$  et  $W_2$  calculées sont ensuite comparées aux vitesses mesurées. On constate une bonne concordance entre les valeurs  $W_1/W_2$  calculées et celles mesurées sur les coupes 3 et 4 proches de la couronne. L'épaisseur relative des profils restant faible, ceci entraîne que les effets du frottement sont beaucoup moins remarquables que sur la coupe 2, et surtout la coupe 1.

| coupe                | 1    | 2    | 3    | 4    |
|----------------------|------|------|------|------|
| ( $W_1/W_2$ ) calcul | .665 | .745 | .795 | .830 |
| ( $W_1/W_2$ ) mesuré | .570 | .700 | .780 | .840 |
| $r/R_e$              | .56  | .67  | .78  | .89  |

D'autre part, les effets de l'écoulement tri-dimensionnel au moyeu sont encore fortement ressentis à l'endroit de la coupe 1.

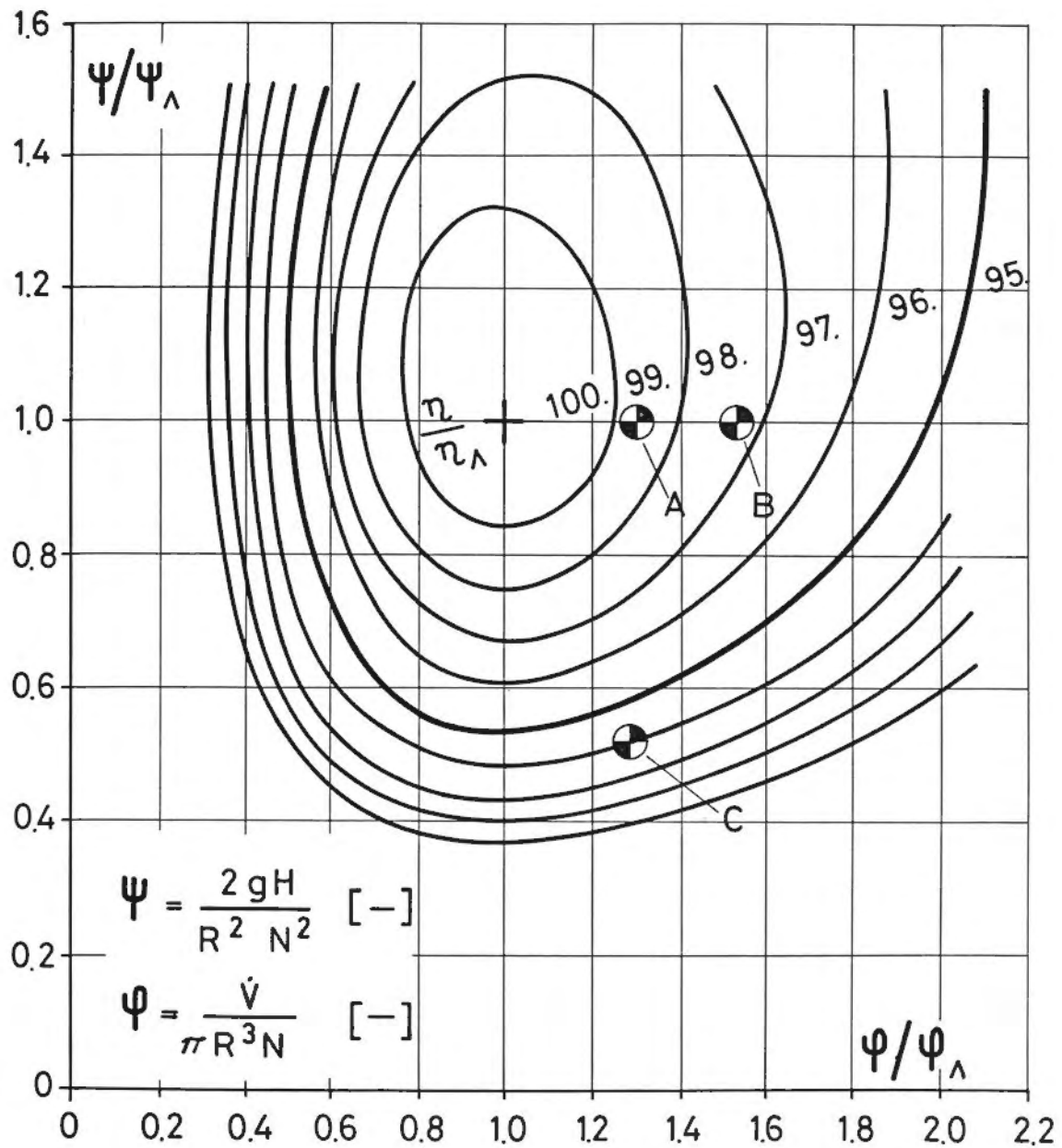


Figure 2: Représentation des points de fonctionnement sur la colline de rendement

#### 4. ESTIMATION DU $\sigma$ THEORIQUE LOCAL

On détermine par rapport aux conditions d'écoulement le long de l'arête le coefficient de pression pour lequel le danger de cavitation apparaît à un  $\sigma$  donné. Celui-ci dépend fortement des vitesses relatives à l'entrée et varie donc avec le rayon selon la relation, calculée sans pertes:

$$\sigma_{th} = W_{\infty}^2 (1 - c_p) + Cl^2 - 1 - Wl^2$$

A partir de  $-cp \text{ max}$ , on calcule sur chaque coupe, au point de fonctionnement considéré, le  $\sigma$  théorique au-dessous duquel un danger de cavitation existe. En introduisant dans la relation citée plus haut, les valeurs de  $Cl$ ,  $Wl$  et  $W_{\infty}$  mesurées, ainsi que la valeur  $-cp \text{ max}$  calculée, on trouve, au point choisi:

| coupes | 1   | 2   | 3   | 4   |
|--------|-----|-----|-----|-----|
| th     | 1.2 | 1.0 | 1.4 | 2.2 |

Pour les coupes 2 à 4, les valeurs de  $\sigma_{th}$  calculées se sont révélées correspondre relativement bien aux  $\sigma$  d'apparition de la poche de cavitation sur le modèle. Celle-ci apparaît d'abord vers la couronne pour s'étendre, le chiffre de cavitation diminuant, jusqu'à un point située entre les coupes 1 et 2. La prédiction du  $\sigma$  d'apparition sur la coupe 1 ne correspond pas à la visualisation du fait de l'écart important entre les valeurs mesurées et calculées des vitesses à cet endroit. Pour une valeur  $\sigma = 0.6$ , on n'observe toujours pas de cavitation d'entrée sur la coupe 1. Une erreur de 0.5 degré sur l'angle  $\beta_{s\infty}$  est suffisante pour expliquer cette différence, néanmoins l'épaisseur du pic est encore si faible à  $\sigma = 0.6$  ( $\Delta L/L \ll 1$ ) qu'on peut douter de son influence sur la création d'une poche de cavitation.

## 5. MODIFICATION DU PROFIL

La comparaison des résultats théoriques du calcul avec les figures de cavitation observées sur le modèle ont conduit à modifier l'arête à partir de la couronne en direction du moyeu. La modification, relativement importante à la couronne va en diminuant, jusqu'à s'annuler entre les coupes 1 et 2 (figure 3). Les limites fixées à cette modification étant d'une part la nécessité de ne pas altérer la colline de rendement, et d'autre part d'éviter une cavitation intrados, il n'était évidemment pas possible de couper complètement le pic de dépression à l'entrée.

Le passage des coupes 2, 3 et 4 dans le programme inverse permet de dégager certaines remarques: La figure 5 représente l'intensité des pics avant et après modification en fonction des 2 paramètres  $-cp \text{ max}$  et  $\Delta L/L$ , soit l'épaisseur du pic pour une valeur correspondant à  $\sigma = 0.7$ . Les crêtes des pics de dépression ont toutes pu être diminuées, mais on remarque qu'à la plus grande diminution de  $-cp \text{ max}$ , correspondant à  $\Delta\sigma_{th} = \Delta cp W_{\infty}^2 = 1.1$ , une augmentation de l'épaisseur du pic apparaît. D'autre part, le programme mettant en oeuvre de petites perturbations linéarisées, il est nécessaire d'effectuer le calcul à une incidence relativement faible, pour laquelle le pic de dépression ne soit pas trop grand, de manière à pouvoir en modifier la forme tout en respectant les hypothèses de calcul.

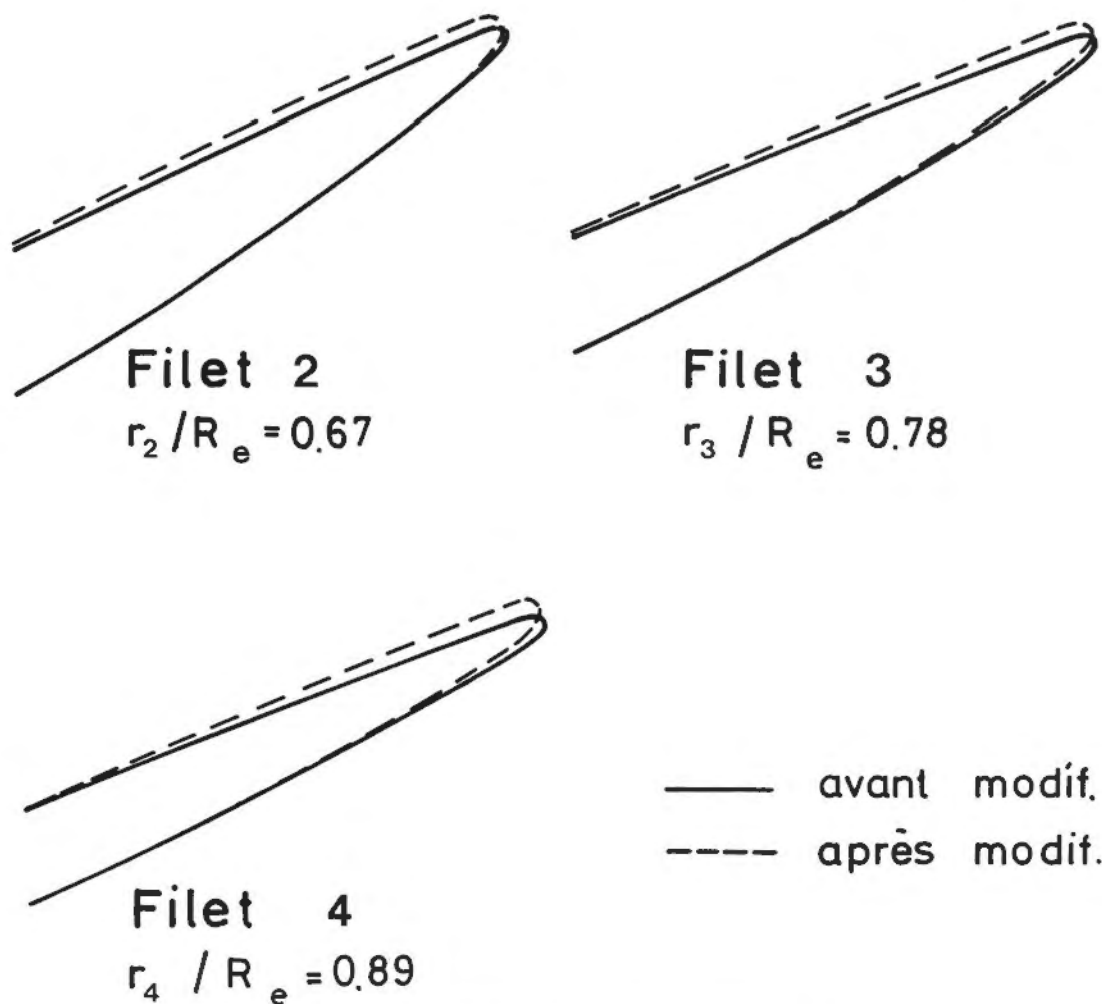


Figure 3: Modification des profils d'entrée

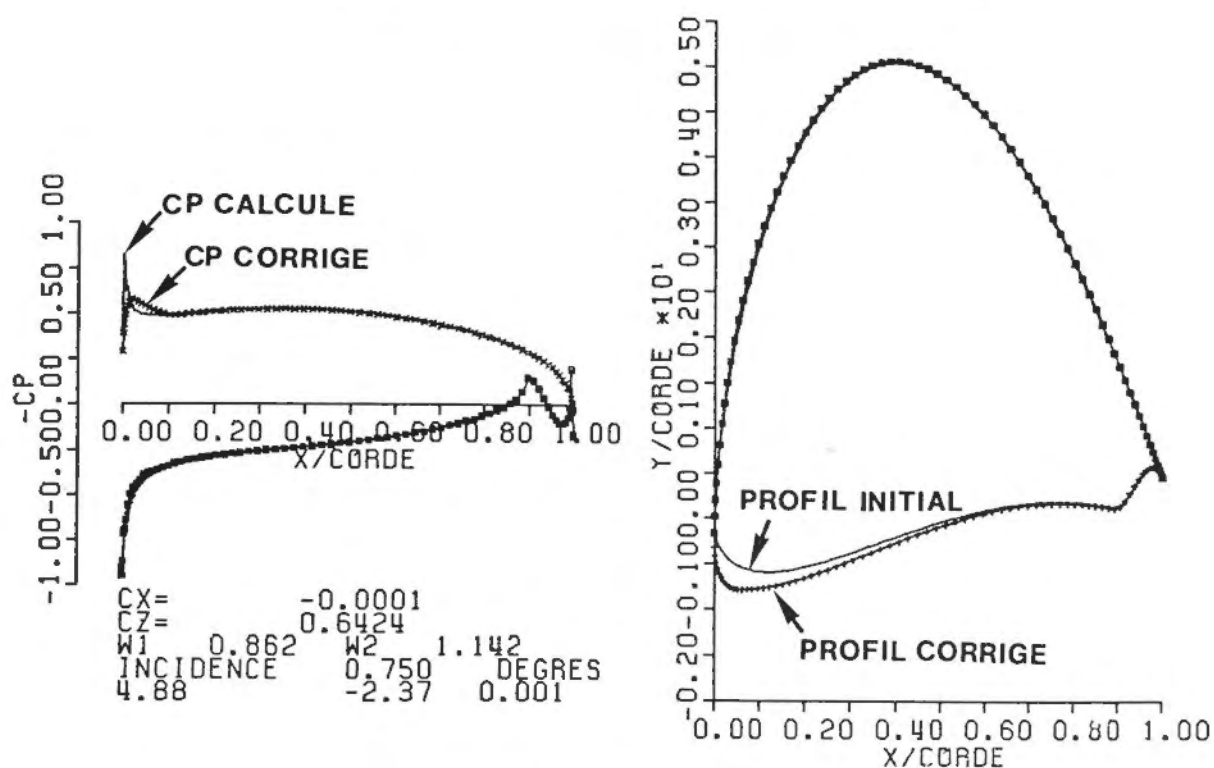


Figure 4: Exemple de calcul inverse



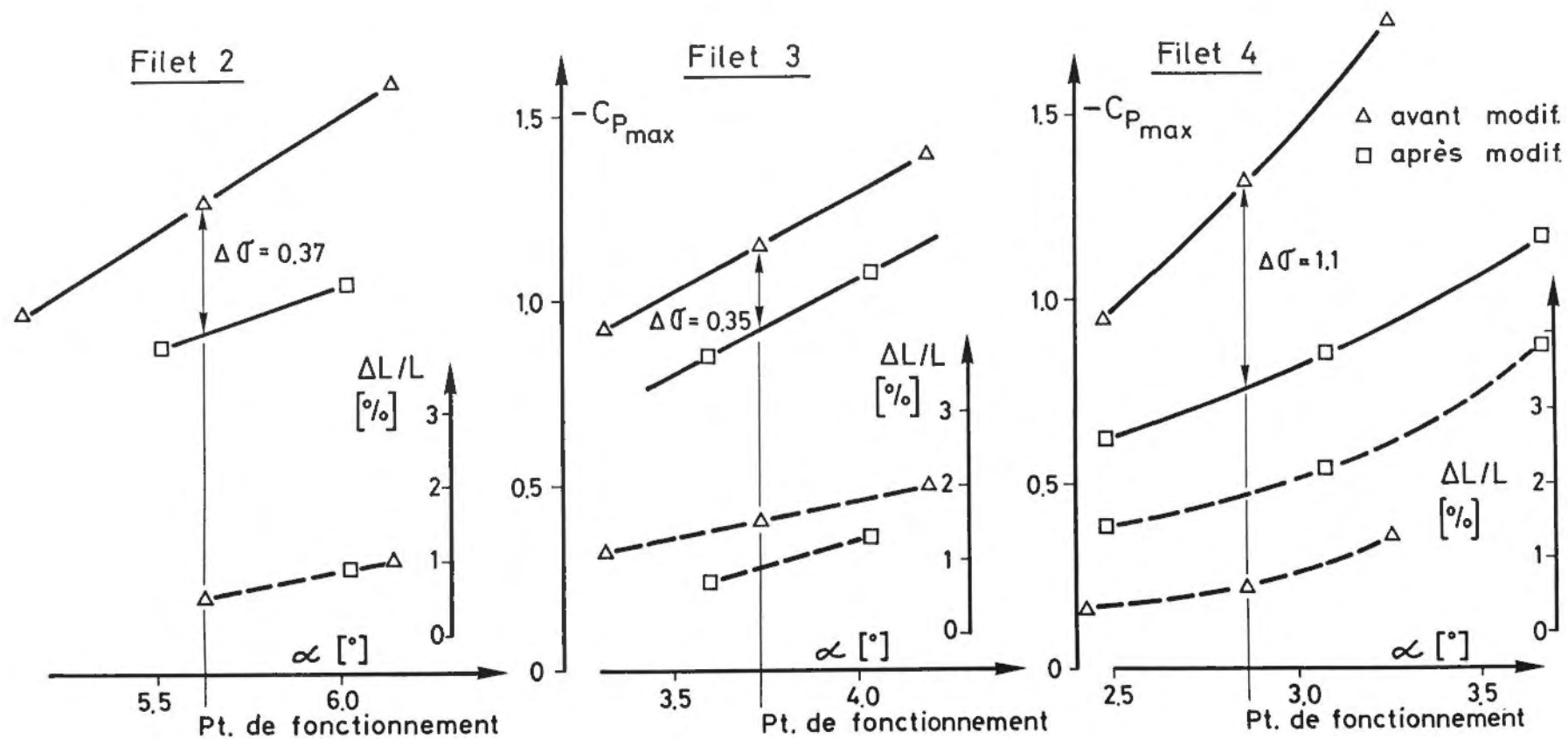


Figure 5: Représentation de la variation des caractéristiques du pic de dépression pour les filets 2, 3 et 4



Un exemple de calcul est présenté dans la figure 4. La répartition de pression a été perturbée à l'entrée du profil, côté extrados uniquement sur une longueur relative de 10%. L'influence sur la modification du profil est visible sur la courbe contiguë, où le profil est représenté avec une ordonnée dilatée 20 fois. Un tel code de calcul potentiel est particulièrement utile pour une étude du bord d'attaque, car il permet de connaître rapidement l'influence d'une modification de profil sur la répartition de pression dans la plage d'incidences désirée.

Une série de simulations sur ordinateur permet d'éviter un grand nombre de modifications du modèle. L'intérêt économique d'une telle démarche est donc évident, pour autant que le calcul soit bien calé par un essai de base en laboratoire.

## 6. ANALYSE DES RESULTATS DE LA MODIFICATION

Les effets de la modification se sont révélés correspondre très largement aux prédictions du calcul. Les résultats obtenus sur trois points de fonctionnement significatifs sont présentés ici. Tout d'abord le point A: il s'agit du point de calcul, situé au  $\psi_{\Lambda}$ , pour une valeur de  $\phi/\phi_{\Lambda} = 1.3$ . Le point B montre le comportement de l'aubage à une valeur de débit plus importante, ( $\phi/\phi_{\Lambda} = 1.52$ ), tandis que le point C correspond au fonctionnement à faible chute pour  $\psi/\psi_{\Lambda} = 0.52$  (figure 2).

Une première remarque qui ressort des essais sur modèle réduit est que les caractéristiques de rendement et de débit avant et après modification présentent la même évolution en fonction du coefficient de cavitation, compte tenu de l'imprécision des mesures. Ce fait revêt une grande importance, une optimisation d'un aubage en ce qui concerne la tenue en cavitation ne devant pas se traduire par une baisse des performances de rendement (planches I à III).

En ce qui concerne les figures de cavitation proprement dites, (voir photos), on constate aux points A et B une très nette diminution de celles-ci consécutive à l'amélioration du profil. Cette diminution est surtout sensible côté couronne, (où la cavitation a même disparu), le nouveau profil à cet endroit étant assez différent de l'ancien. L'amélioration est moins marquée au fur et à mesure que l'on se rapproche du moyeu, parallèlement à la diminution en importance de la modification. Dans la zone d'arête non touchée, soit à proximité du moyeu, les figures de cavitation restent les mêmes. Au point C, représentatif d'une région où la cavitation d'entrée n'est pas prépondérante, voire inexistante, le comportement de l'aubage est resté inchangé. En particulier, on n'observe pas de cavitation du côté intrados. On peut donc dire que le nouveau profil est beaucoup moins sensible à une variation de l'angle d'incidence. Pour tous les points observés, l'apparition de la cavitation d'entrée est fortement retardée, ainsi que son développement.

Le choix du critère servant de base à la méthode, soit le coefficient de dépression maximum théorique -  $cp_{\max}$  paraît tout à fait justifié au vu de ce qui précède. On peut considérer ainsi la valeur de l'intensité du pic comme représentative du risque d'apparition et de développement de la cavitation. Dans notre cas, il semble que la largeur de ce pic ait joué un rôle très secondaire.



A11



A21



A31

avant modification



A12



A22



A32

après modification

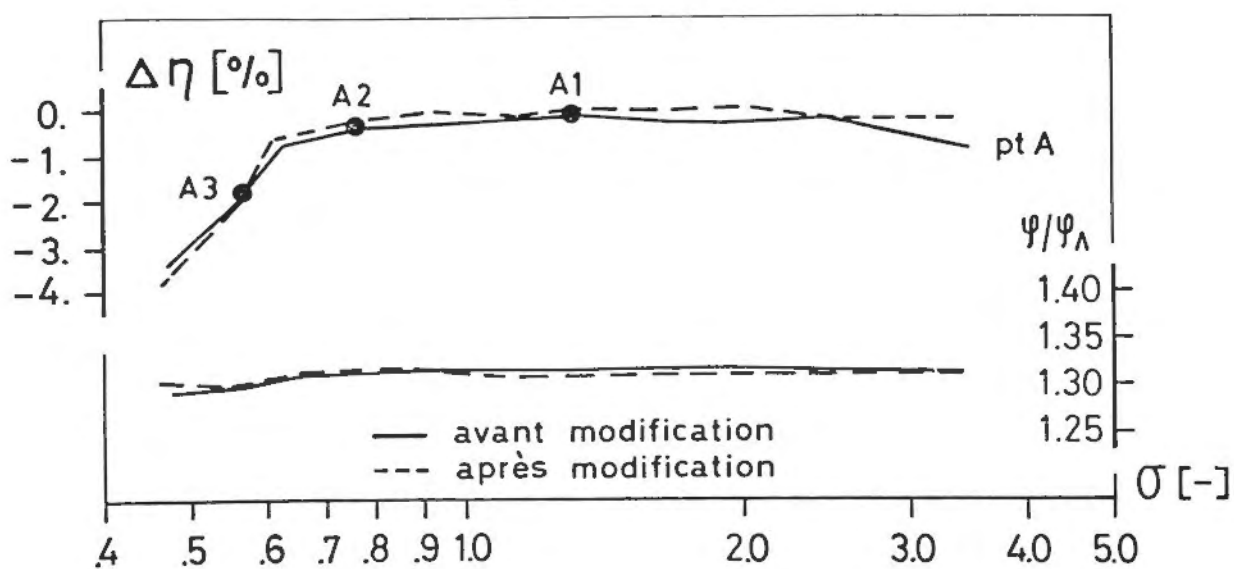


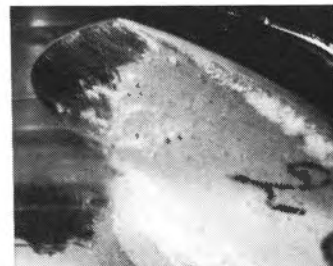
Planche I: Point de fonctionnement A



B11



B21



B31

avant modification



B12



B22



B32

après modification

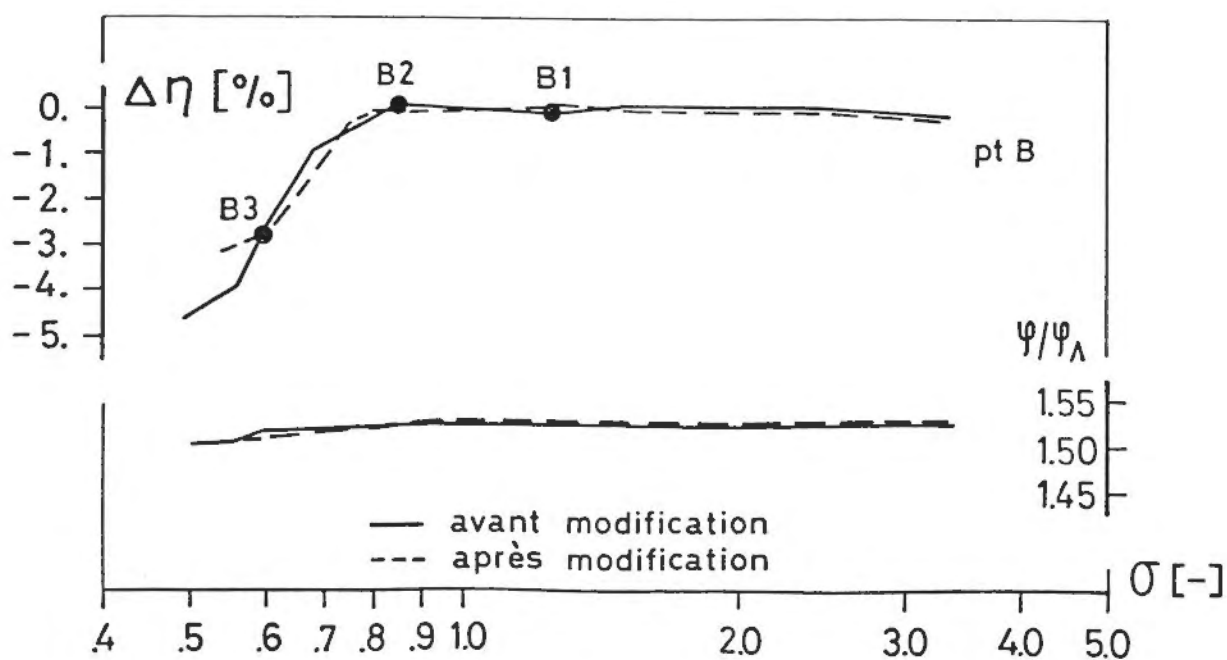


Planche II: Point de fonctionnement B



C11



C 12

avant modification

après modification

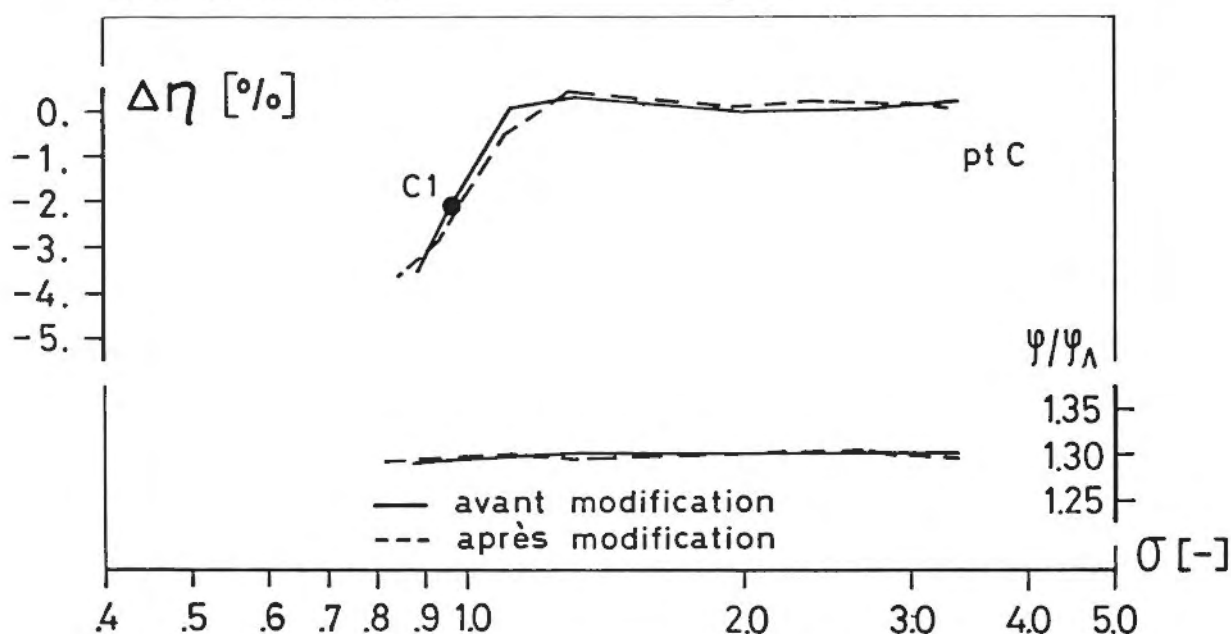


Planche III: Point de fonctionnement C

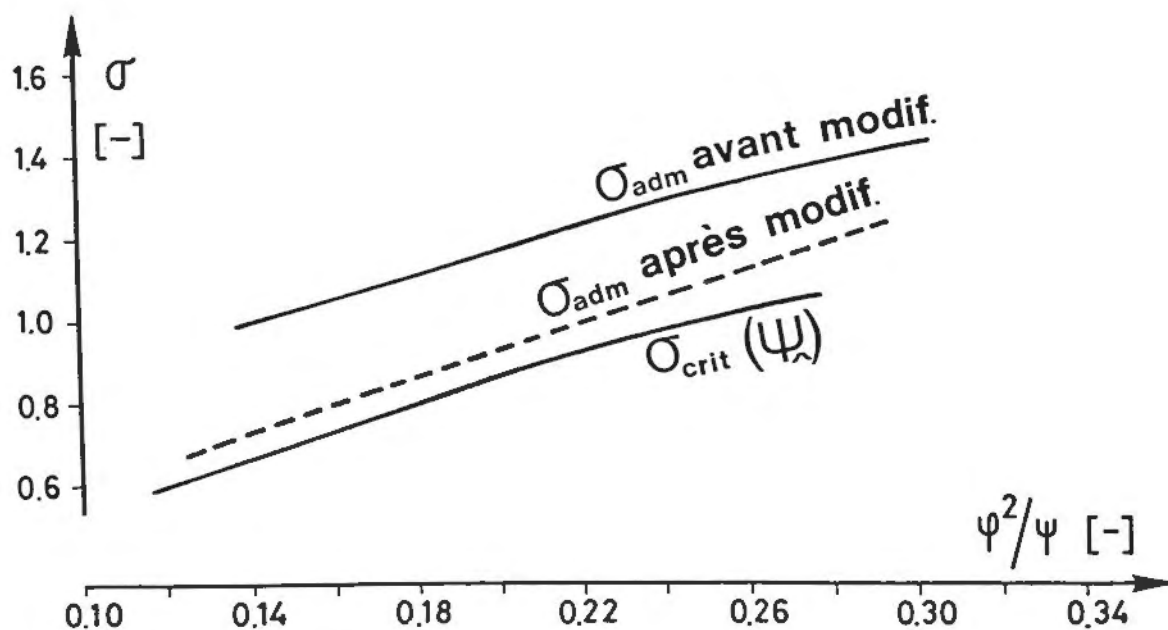


Figure 6: Evolution de sigma en fonction de  $\phi^2/\psi$

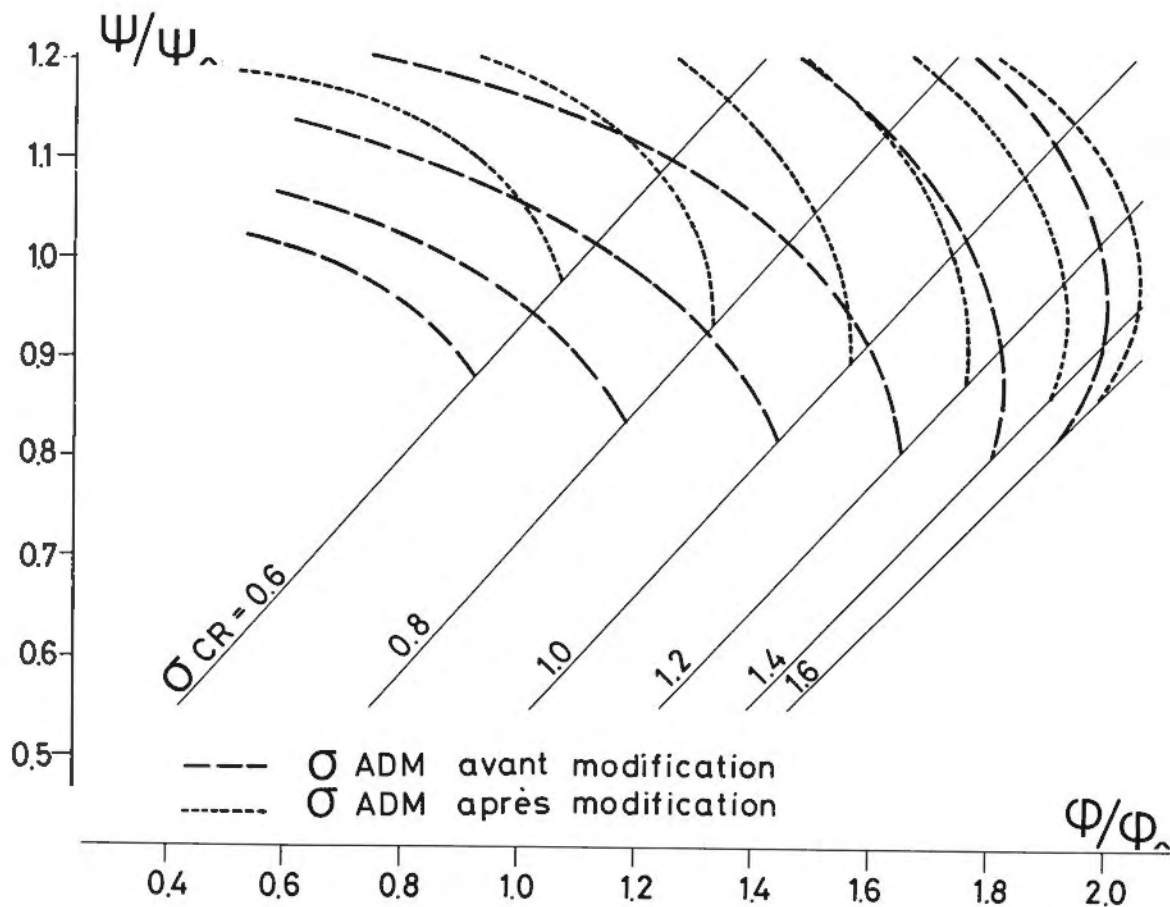


Figure 7: Représentation globale du gain obtenu

Pour mieux quantifier le gain obtenu en ce qui concerne les performances de l'aubage dans la région du  $\psi_\lambda$ , il est intéressant de représenter l'évolution du  $\sigma$  admissible en fonction de l'énergie cinétique rapportée à la chute, soit de la valeur  $(\phi^2/\psi)$ . (figure 6). La diminution de l'écart entre la courbe représentative du  $\sigma$  critique et celle du

$\sigma$  admissible après modification de l'arête d'entrée y est particulièrement sensible. La figure 7 quant à elle, reprend le système de représentation de la figure 1. Le gain obtenu pour une chute donnée sur la valeur du débit spécifique maximum n'est pas négligeable. Une nouvelle correction du tracé, cette fois à partir du filet 3 en direction du moyeu devrait permettre d'améliorer encore le gain obtenu. Dans l'interaction couche-limite - poche de cavitation, la diminution de l'intensité du pic réduit le danger de décollement laminaire et par conséquent de détachement de la poche en aval. (1)

- (1) Attached Cavitation and the Boundary Layer: experimental investigation and numerical treatment - by J.P. Franc and J.M. Michel - JMF vol. 154, 1985.

## 7. CONCLUSIONS

L'application de la méthode de calcul inverse bi-dimensionnelle faisant l'objet de la communication présente s'est révélée très efficace dans le cas de l'amélioration de la tenue à la cavitation d'un aubage modèle réduit Kaplan 4 pales. Cette méthode relativement peu coûteuse devrait être d'une grande utilité dans l'amélioration, voire l'élaboration du tracé de l'arête d'entrée de tels aubages. Mais au stade actuel, elle reste basée sur une considération des pressions hors cavitation. Il faudrait la compléter par une introduction de l'interaction cavitation, niveau de pression et couche limite.

## NOMENCLATURE

|                   |  |                                     |
|-------------------|--|-------------------------------------|
| $\wedge$          | relatif au point de meilleur rendement           |                                     |
| H                 | chute  | [m]                                 |
| $\dot{V}$         | débit-volume                                     | [m <sup>3</sup> . s <sup>-1</sup> ] |
| N                 | vitesse de rotation de la roue                   | [s <sup>-1</sup> ]                  |
| Re                | rayon extérieur de la roue                       | [m]                                 |
| Ri                | rayon du moyeu                                   | [m]                                 |
| r                 | rayon de la coupe cylindrique                    | [m]                                 |
| L                 | corde du profil                                  | [m]                                 |
| C1                | vitesse amont normée avec $\sqrt{2gH}$           | [-]                                 |
| W1                | vitesse amont relative                           | [-]                                 |
| W2                | vitesse aval relative                            | [-]                                 |
| $\vec{W}_\infty$  | $(\vec{W}_1 + \vec{W}_2) / 2$                    |                                     |
| cp                | $1 - (W/W_\infty)^2$ coefficient de pression     | [-]                                 |
| $\alpha$          | angle de $\vec{W}_1$ par rapport à la corde      | [°]                                 |
| $\beta_{s\infty}$ | angle de $\vec{W}_\infty$ par rapport à la corde | [°]                                 |
| $\eta$            | rendement de la machine                          | [-]                                 |
| $\sigma$          | chiffre de cavitation                            | [-]                                 |
| $\Phi$            | $\dot{V} / (\pi Re^3 N)$ chiffre de débit        | [-]                                 |
| $\Psi$            | $(2 \cdot gH) / (Re N)^2$ chiffre d'énergie      | [-]                                 |

## Remerciements:

Les auteurs tiennent à remercier la Commission pour l'Encouragement à la Recherche Scientifique (CERS) pour son soutien financier dans le cadre de l'étude de la méthode inverse.